

[http://www.wissenschaft.de/archiv/-/journal\\_content/56/12054/1534017/Wie-kam-Einstein-auf-die-Allgemeine-Relativit%C3%A4tstheorie%3F/](http://www.wissenschaft.de/archiv/-/journal_content/56/12054/1534017/Wie-kam-Einstein-auf-die-Allgemeine-Relativit%C3%A4tstheorie%3F/)

18.01.2011 –

## Wie kam Einstein auf die Allgemeine Relativitätstheorie?

„Ich sass auf meinem Sessel im Berner Patentamt, als mir plötzlich folgender Gedanke kam: Wenn sich eine Person im freien Fall befindet, dann spürt sie ihr eigenes Gewicht nicht. Ich war verblüfft. Dieser einfache Gedanke machte auf mich einen tiefen Eindruck. Er trieb mich in Richtung einer Theorie der Gravitation.“ So erzählte Albert Einstein 1922 in einer Vorlesung an der japanischen Universität von Kyoto, wie er im November 1907 an einem Überblicksartikel über die Konsequenzen der SRT geschrieben und eingesehen hatte, „daß alle natürlichen Phänomene mit Ausnahme des Gravitationsgesetzes in den Begriffen der speziellen Relativitätstheorie dargestellt werden konnten. Ich verspürte eine tiefe Sehnsucht, den Grund dafür zu erkennen.“ Mit seinem Einfall im Patentamt war Einstein „auf den glücklichsten Gedanken“ seines Lebens gekommen. So formulierte er es 1920 in einem Rückblick für die Zeitschrift Nature, der aber nicht gedruckt wurde, weil er den Redakteuren zu lang erschien.

„Für einen Beobachter, der sich im freien Fall vom Dach eines Hauses befindet, existiert – zumindest in seiner unmittelbaren Umgebung – kein Gravitationsfeld. Wenn nämlich der fallende Beobachter einige andere Körper fallen läßt, dann befinden sie sich im Bezug auf ihn im Zustand der Ruhe oder gleichförmigen Bewegung“, führte Einstein damals weiter aus. Und er schrieb: „So ist die experimentell nachgewiesene Unabhängigkeit der Fallbeschleunigung ein starkes Argument für die Tatsache, daß das Relativitätspostulat auch auf Koordinatensysteme ausgedehnt werden muß, die sich zueinander in nicht gleichförmiger Bewegung befinden.“

### Schwer macht träge

Damit ging Einstein über den Gültigkeitsbereich der SRT hinaus, denn das „Spezielle“ an der SRT ist ja gerade, dass sie nur spezielle Bezugssysteme beschreibt: solche, die gleichförmig sind. Beschleunigungen und die Wirkung der Gravitation behandelt sie nicht. Dass diese im Prinzip dasselbe sind, war Einsteins Grundidee in Bern. Er postulierte das von ihm so genannte Äquivalenzprinzip, für das es bis heute keine physikalische Erklärung gibt, obwohl Experimente das Prinzip mit immer größerer Genauigkeit bestätigen haben. Einstein machte es zum Ausgangspunkt der ART: Die schwere Masse im Gravitationsfeld, messbar beispielsweise mit einer Federwaage, und die träge Masse, die sich einer Beschleunigung widersetzt, sind gleich groß. „Die Allgemeine Relativitätstheorie verdankt ihre Entstehung der Erfahrungstatsache von der numerischen Gleichheit der trägen und der schweren Masse der Körper“, hat es Einstein ausgedrückt. Tatsächlich würde ein Physiker in einem geschlossenen Zimmer nicht herausfinden können, ob das Butterbrot, das vom Frühstückstisch auf den Boden fällt (natürlich mit der Butterseite voran ...) dies aufgrund der Schwerkraft tut – oder weil das Zimmer in Wirklichkeit eine Kabine in einem Raumschiff ist, das entgegen der Fallrichtung des Butterbrots konstant beschleunigt wird.

Auch umgekehrt wird ein Prinzip daraus: Fern von jeder Gravitationsquelle ist man schwerelos – aber auch im freien Fall, wenn etwa die Leine einer Fahrstuhlkabine reißt. Bei Parabelflügen macht man sich diesen Effekt zunutze, beispielsweise zum Astronautentraining und zur Mikrogravitationsforschung, indem man ein Flugzeug 10 bis 20 Sekunden lang absacken lässt. Die Folge ist eine kurze Schwerelosigkeit – eine sehr erträgliche Leichtigkeit des Seins, wie sie der Autor am eigenen Leib erfahren hat (Bild der Wissenschaft 5/2006, „Höhenflug beim Absturz“). Tatsächlich sind auch Astronauten in der Erdumlaufbahn, etwa in der Internationalen Raumstation, nicht deshalb schwerelos, weil sie durchs All fliegen. Die Gravitation der Erde ist in 400 Kilometer Höhe immer noch recht stark. Sondern die Astronauten schweben herum, weil sie sich gleichsam im permanenten freien Fall befinden – im kreisförmigen Dauersturz rund um den Globus.

Aus dem Äquivalenzprinzip zog Einstein eine erstaunliche Schlussfolgerung: Die Schwerkraft müsste Lichtstrahlen beeinflussen. Zum einen sollte sie deren Frequenz vermindern („Gravitationsrotverschiebung“), zum anderen die Bahn der Strahlen ablenken, wenn sie an einem schweren Körper vorbeikommen. Einstein hielt den Effekt aber für viel zu schwach, um ihn messen zu können.

### GRAVITATION VERBIEGT DAS LICHT

Erst 1911 befasste er sich wieder mit dem Thema, mittlerweile als Physik-Professor in Prag. In seinem Artikel „Über den Einfluß der Gravitation auf die Fortpflanzung des Lichts“ beschrieb er, wie die Lichtablenkung eventuell doch nachweisbar wäre: mittels einer exakten Positionsbestimmung von Sternen nahe am Sonnenrand bei einer totalen Sonnenfinsternis. In seinem Artikel prognostizierte er einen Winkel der Lichtablenkung um 0,87 Bogensekunden. Einstein wusste damals noch nicht, dass Masse den Raum krümmt und deshalb der vorausgesagte Wert um den Faktor 2 zu gering ist. Übrigens hätte schon Isaac Newton eine Ablenkung von 0,87 Bogensekunden aus seinem Gravitationsgesetz und seiner korpuskularen Lichttheorie errechnen können.

Die Raumkrümmung, die sich nur schwer veranschaulichen lässt (siehe Grafik „Auf krummen Touren“) entdeckte Einstein 1912. Damals war er, frustriert von den überbordenden Verwaltungsaufgaben in Prag – „die Tintenschießerei ist endlos“ – als ordentlicher Professor an seine Alma mater zurückgekehrt, die ETH Zürich. Im Sommer erkannte er, dass er die nichteuklidische Geometrie für seine (damals schon Allgemeine Relativitätstheorie genannte) Gravitationstheorie benötigte. Beim Verständnis und der Anwendung dieser schwierigen Mathematik zur Beschreibung der Raumkrümmung half ihm sein früherer Kommilitone Marcel Grossmann, der inzwischen Mathematik-Professor an der ETH war.

### „Ihnen wird NIEMAND GLAUBEN“

An den Physiker Arnold Sommerfeld schrieb Einstein am 29. Oktober 1912, dass er „sich im Leben noch nicht annähernd so geplatzt“ habe und „große Hochachtung für die Mathematik eingefloßt bekommen habe, die ich bis jetzt in ihren subtileren Teilen in meiner Einfalt für puren Luxus ansah! Gegen dies Problem ist die ursprüngliche Relativitätstheorie eine Kinderei.“ Der Physik-

Nobelpreisträger Max Planck, der maßgeblich die Spezielle Relativitätstheorie bekannt gemacht hatte und Einstein 1913 besuchte, hielt das Unterfangen sogar für aussichtslos: „Als alter Freund muß ich Ihnen davon abraten, weil Sie einerseits nicht durchkommen werden; und wenn Sie durchkommen, wird Ihnen niemand glauben.“

Aber Einstein blieb hartnäckig und arbeitete, teilweise mit Grossmann, weiter an der nichteuklidischen Gravitationstheorie, die selbst der brillante Isaac Newton nicht hätte finden können, weil es damals noch gar nicht das mathematische Handwerkszeug dazu gab. Eine intensive Beschäftigung war Einstein freilich erst 1915 möglich, nach seinem Umzug nach Berlin. „Ostern gehe ich nämlich nach Berlin als Akademiemensch ohne irgendeine Verpflichtung, quasi als lebendige Mumie“, schrieb er 1914 an seinen Freund und früheren Mitarbeiter Jakob Laub und berichtete, dass er zum Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften ernannt worden war, wo er nicht mehr unterrichten und Studenten betreuen musste. „Ich freue mich auf diesen schwierigen Beruf!“ Einstein „hatte genug von den Vorlesungen. Alles, was er wollte, war denken“, beschrieb es der Quantenphysiker Abraham Pais in der ersten wissenschaftlichen Biografie des Jahrhundert-Genies.

### **Durchbruch in Berlin**

In der zweiten Jahreshälfte 1915 tat Einstein hauptsächlich das: Denken. Er revidierte mehrfach seine Ergebnisse. „Es ist bequem mit dem Einstein. Jedes Jahr widerruft er, was er das vorige Jahr geschrieben hat“, bemerkte er selbstironisch in einem Brief an den befreundeten Physiker Paul Ehrenfest. Im November ging es dann Schlag auf Schlag: Zunächst gelang es Einstein, die seit Jahrzehnten rätselhafte Periheldrehung des Merkur mit der Allgemeinen Relativitätstheorie vollständig zu beschreiben (siehe Grafik „Merkur auf Abwegen“). „Ich war einige Tage fassungslos vor freudiger Erregung“, erinnerte er sich später.

Am 18. November 1915 gab Einstein bekannt, dass er für die Ablenkung des Sternlichts durch die Sonne nun einen Wert von 1,74 Bogensekunden errechnet hatte – das Doppelte der Voraussage von Newtons Gravitationstheorie. So stand diese nun direkt mit Einsteins Theorie im Widerspruch. Und der sollte sich prinzipiell durch Messungen entscheiden lassen. Am 25. November waren die letzten Fehler im Gebäude der Allgemeinen Relativitätstheorie beseitigt. Damit stand sie in ihrer bis heute gültigen Form vor den erstaunten und kritischen Augen der Physiker. Bis zu der dann 1916 in den Annalen der Physik veröffentlichten Darstellung hatte Einstein „mehr als zwölf Arbeiten über Gravitation verfasst und dabei jedesmal die Schlussfolgerungen der jeweils vorangegangenen Arbeit aufgehoben“, brachte es Abraham Pais auf den Punkt. Einstein meinte später: „Im Lichte bereits erlangter Erkenntnis erscheint das glücklich Erreichte fast wie selbstverständlich, und jeder intelligente Student erfaßt es ohne große Mühe. Aber das ahnungsvolle, Jahre währende Suchen im Dunkeln mit seiner gespannten Sehnsucht, seiner Abwechslung von Zuversicht und Ermattung und seinem endlichen Durchbrechen zur Klarheit, das kennt nur, wer es selber erlebt hat.“ ■

**18.01.2011**

---